

生物科学専攻

専門科目

[注意事項]

1. 試験開始の合図があるまで、この問題冊子を開いてはならない。
2. 解答には、必ず黒色鉛筆（または黒色シャープペンシル）を使用すること。

[以下、特に重要]

3. 問題冊子1冊と答案用紙4枚が配られているか確かめること。過不足がある場合は挙手して監督者に知らせること。
4. 問題は全部で5問ある。問題の内訳と選択解答の方法は以下の通りである。
 - 第1問～第4問：それぞれ、分子生物学、細胞生物学、生化学、遺伝学の筆記問題
 - 第5問：論述形式の問題で、生物化学、生物情報科学、動物学、植物学、人類学、進化・自然誌学分野の13の小問からなる。**第1問～第4問から、任意の2問を選んで解答せよ。**
また、第5問の13の小問から、任意の2つの小問を選択して解答せよ。なお、第5問では同じ分野から2つの小問を選択しても良い。
5. **第1問～第4問から選択した2問と、第5問から選択した2つの小問の解答を、それぞれ答案用紙1枚ずつに分けて、合計4枚に記入すること。**
6. 各答案用紙の所定欄に受験番号および氏名を必ず記入すること。
7. 第1問～第4問については、各答案用紙の問題番号欄に問題番号をひとつだけ記入すること。第5問については、「5小問X（Xは小問の問題番号）」のように記入すること。
8. 答案用紙の科目名の欄には、「専門科目」と記入すること。
9. 答案用紙の裏面も使用する場合は、表面にその旨明示すること。ただし、答案用紙は上部区切り線で綴じられるので、区切り線より上部は使用しないこと。
10. 答案用紙には、解答に関係のない文字、記号、符号などを記入してはならない。
11. 解答しない場合でも答案用紙には受験番号、氏名、および問題番号を記入して提出すること。
12. 答案用紙を草稿用紙として絶対使用しないこと。草稿用紙は問題冊子にあるが、切り離さないで用いること。また問題冊子の余白は自由に使ってよい。
13. 試験時間は2時間30分である。原則として試験終了時間まで席を離れることは許さない。

この問題冊子は試験終了後に回収する。以下の欄に受験番号と氏名を記入すること。

受験番号		氏名	
------	--	----	--

草稿用紙

草稿用紙

[第1問]

次の文1と文2を読み、以下の問1～8に答えよ。

<文1>

多くの生物において、遺伝情報はゲノム DNA に保持されており、(a)DNA ポリメラーゼによって DNA が正確に複製されることで、遺伝情報が次世代へ継承される。DNA にコードされた遺伝情報は、DNA を鋳型にして RNA を合成する転写と呼ばれる過程を介して RNA へ伝達され、さらにはタンパク質へと翻訳される。一方、転写とは逆に、RNA を鋳型にして DNA を合成する過程は、逆転写と呼ばれ、この反応を触媒する酵素は(b)逆転写酵素として知られる。(c)レトロウイルスなどの一部のウイルスは逆転写酵素をもち、ウイルスの増殖に逆転写が必須である。レトロウイルス由来の逆転写酵素は、(d)分子生物学的研究に広く用いられている。

- 問1. 下線部 (a) について。DNA の複製過程において、DNA ポリメラーゼが触媒する DNA 合成の正確性は極めて高い。DNA ポリメラーゼの正確性を支える機構を2つ挙げ、それぞれ2行程度で説明せよ。
- 問2. 下線部 (b) について。逆転写酵素の DNA 合成の正確性は、DNA ポリメラーゼより低い。逆転写酵素の正確性が低いことは、ウイルスにとって利点にもなりうる。それは、どのような点か、2行程度で説明せよ。
- 問3. 下線部 (c) について。レトロウイルスの説明として適するものを、以下の選択肢 (ア) ～ (エ) より全て選べ。
- (ア) ウイルスのゲノムは RNA からなり、逆転写によって DNA を作り、これを転写して自らを複製する。
 - (イ) ウイルスのゲノムは DNA からなり、いったん RNA に転写した後、さらに逆転写によって DNA を作り、自らを複製する。
 - (ウ) ウイルスゲノムから作られる DNA は宿主の染色体に組み込まれる。
 - (エ) 新型コロナウイルス (SARS-CoV-2) はレトロウイルスの1種である。
- 問4. 下線部 (d) について。逆転写酵素を利用して、ある組織の RNA から cDNA を作製する方法を4行程度で説明せよ。なお、解答は、「組織から RNA を精製し、」から始めて、「二本鎖 cDNA を合成する」で終わること。

<文 2>

生体において、個々の細胞の細胞系譜を明らかにすることは、複雑な組織構築の過程を理解する上で重要である。例えば、遺伝子改変マウスを利用して、特定の細胞を緑色蛍光タンパク質 (GFP) で標識すれば、その細胞から派生する細胞を追跡できる。大学院生の A さんは、神経細胞を生み出す親細胞である神経系前駆細胞を GFP で標識できるトランスジェニックマウスを作製した。さらに、このマウス胎仔の脳において、神経細胞が生まれる時期と神経細胞の脳内での配置との関係を調べるため、以下の実験を行った。

[実験 I]

マウス胎仔の大腦半球の中央部分には、体液で満たされた脳室がある (図 1)。この脳室の近傍に神経系前駆細胞が存在している。大腦の背側領域では、脳発生の特定の時期において神経系前駆細胞が非対称分裂 (1 つの神経系前駆細胞と 1 つの神経細胞を産出する細胞分裂) を繰り返し、その結果として神経系前駆細胞から神経細胞が継続的に産生される。非対称分裂によって生じた神経系前駆細胞はその場にとどまるが、神経細胞は大腦の表面側へと移動し (図 1 の拡大図)、脳内の最終位置に配置される。

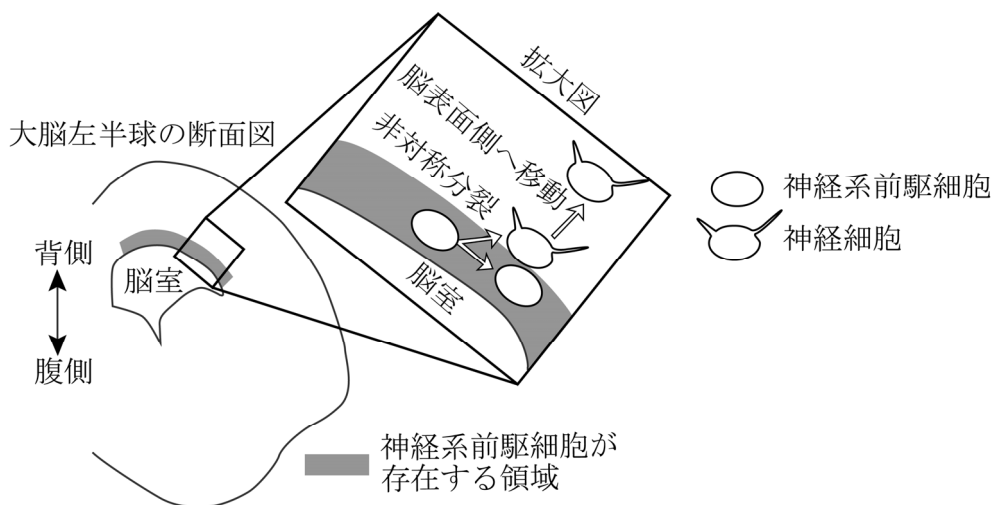


図 1. 大腦の背側領域における神経系前駆細胞からの神経細胞の誕生と移動の模式図。

実験で使用するトランスジェニックマウスには、外来遺伝子として、*GFP* 遺伝子が組み込まれている。また、⑥*GFP* 遺伝子の転写を神経系前駆細胞で特異的に誘導することができ、すみやかに転写および翻訳された *GFP* によって神経系前駆細胞を標識できる。この手法により、妊娠 12 日目に、トランスジェニック胎仔において、全ての神経系前駆細胞を *GFP* で標識した。この実験では、*GFP* 遺伝子の転写を数時間で停止させたため、その後に *GFP* が細胞内で新たに合成されないとする。また、実験期間を通して *GFP* は細胞内で安定に維持され、細

胞分裂に伴って、娘細胞に等しく分配されるものとする。

妊娠 17 日目に、マウス胎仔の脳を取り出して固定し、脳切片を作製した。図 2 の四角で囲まれた大脳背側領域を観察したところ、拡大図に示したように、(e)細胞内の GFP 量が多い神経細胞は脳室側に配置され、細胞内の GFP 量が少ない神経細胞は脳表面側に配置されていた。なお、この実験期間において、神経系前駆細胞は非対称分裂を繰り返すものとする。

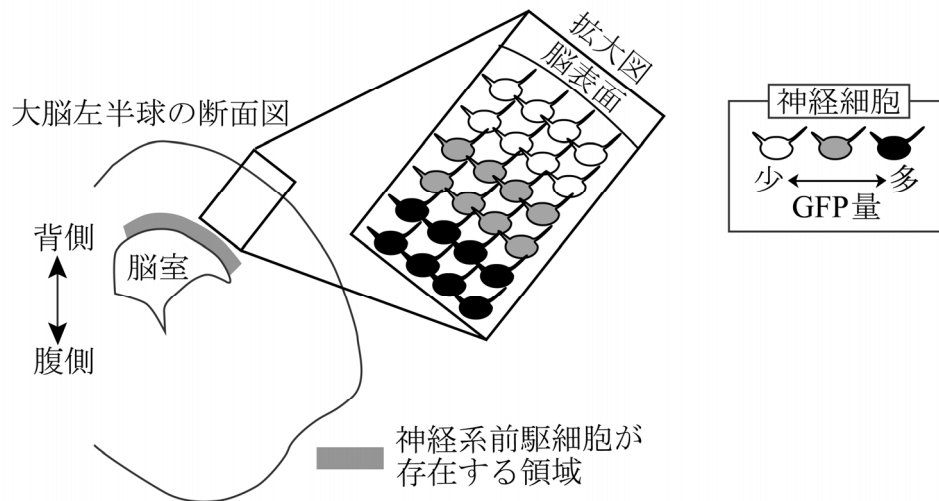


図 2. 大脳の背側領域における GFP で標識された神経細胞の配置。
拡大図には GFP で標識された神経細胞のみを示している。

[実験 II]

X 染色体上の F 遺伝子の翻訳産物 (F タンパク質) は神経細胞の移動に必須である。 F^{mut} 遺伝子は F 遺伝子に変異が生じた遺伝子であり、その翻訳産物 (F^{mut} タンパク質) のみを発現する神経細胞は移動できない。 F 遺伝子および F^{mut} 遺伝子をヘテロ接合としてもつ胎仔を用いて、実験 I と同様の実験を実施した。大脳背側領域における神経細胞の位置を精査したところ、神経細胞の中には、正常な位置に移動しているものと、移動せずに脳室近傍に蓄積しているものがあつた。そこで、個々のマウスについて、これら移動していない細胞と正常に移動している細胞の割合を算出した。数多くのマウスについて調べ、得られた値を平均すると、(e)約 50%の神経細胞は正常に移動するが、残り 50%は移動せずに脳室近傍に蓄積することが判明した。

問5. 下線部 (e) について。この実験で用いたトランスジェニックマウスの作製に関する以下の破線で囲まれた文章を読み、文中の下線を引いた語を使用して、マウスに導入する DNA の設計について 3 行程度で説明せよ。なお、下線を引いた語の全てを使用する必要はない。

Zタンパク質 (Z遺伝子がコードするタンパク質) は、哺乳類の細胞には発現していない転写調節因子である。薬剤 A が存在すると、Zタンパク質は薬剤 A と結合して、DNA の特定の配列 (Z 応答性転写調節領域と呼ぶ) に結合し、その下流につないだ遺伝子を発現させる。薬剤 A が存在しないと、Zタンパク質は Z 応答性転写調節領域に結合できず、下流の遺伝子も転写されない。一方、Yタンパク質 (Y遺伝子がコードするタンパク質) は神経系前駆細胞でのみ発現するタンパク質であり、特定の DNA 配列 (Y 応答性転写調節領域と呼ぶ) に結合して、その下流の遺伝子を発現させる。

これらの知見を基に、マウスに導入する DNA を設計および作製した。さらに、この DNA が全ての細胞の核ゲノムに組み込まれたトランスジェニックマウスを作製した。このマウスを交配して妊娠させた後、妊娠マウスに薬剤 A を投与すると、薬剤 A は胎仔にも取り込まれる。その結果、トランスジェニック胎仔において、薬剤 A が存在する時にだけ、神経系前駆細胞で GFP が合成される。

問6. トランスジェニックマウスのように、特定の遺伝子を含む外来 DNA がゲノム DNA に挿入されている場合、外来 DNA 上のその遺伝子の発現は、ゲノム DNA 上の挿入位置によって、大きく変化する可能性がある。その理由を 2 行程度で説明せよ。

問7. 下線部 (f) について。この結果から、大脳の背側領域では、「神経細胞の生まれる時期」と「神経細胞の配置」が関連していることが示唆される。その関連の具体的な内容を、以下の語句を全て用いて 2 行程度で述べよ。また、その根拠を 3 行程度で説明せよ。なお、誕生した神経細胞はすみやかに移動して、最終位置に配置されるものとする。また、神経細胞は細胞分裂を行わない。さらに、個々の神経細胞の容積は全て同じとする。

早い時期に生まれた神経細胞、遅い時期に生まれた神経細胞、
脳室側に配置、脳表面側に配置

問8. 下線部 (g) について。なぜ、このような表現型が表出したのか。その理由を 5 行程度で説明せよ。なお、Fタンパク質および F^{mut}タンパク質は神経細胞の移動のみに影響を及ぼすものとする。また、神経細胞の移動が異常になっても、その他の細胞には影響を及ぼさないとする。

[第2問]

次の文1と文2を読み、以下の問1～7に答えよ。

<文1>

真核細胞には、細胞骨格と呼ばれる繊維状の構造が存在する。このうち、微小管と は動物細胞と植物細胞に共通してみられ、 は主に動物細胞でみられる。(a)細胞骨格は、細胞の形態維持をはじめとする、細胞の様々な機能に関わっている。

微小管は、 と の2種類のタンパク質からなる二量体で構成されるフィラメントである。微小管には極性があり、末端に が存在する 端でより動的な変化が見られる。微小管を構成する に結合した が加水分解されると微小管は脱重合しやすくなる。

問1. 文1の ～ に適切な用語を入れよ。同じカタカナの空欄には同じ用語が入る。

問2. 下線部 (a) について。細胞の形態維持以外で、微小管が果たす役割を2つ挙げよ。

<文2>

植物の道管を構成する細胞には、細胞全体に厚い細胞壁をもつが部分的に細胞壁が薄い領域 (D 領域とする) が存在するものがある。D 領域は細胞間の物質交換に必要である。道管を構成する細胞へと分化する途中にある細胞 (P 細胞とする) の D 領域の形成には、細胞膜直下にある微小管 (表層微小管) が D 領域でのみ分解されることが重要である (図1)。この仕組みには、2つの保存されたドメインを有するタンパク質 X と、膜に局在する低分子量 G タンパク質 (低分子量 GTPase) であるタンパク質 Y が関わるということがわかっている。A さんは、D 領域の形成の仕組みを調べるため、P 細胞を用いて以下の実験 I～IV を行った。

[実験 I]

P 細胞において、タンパク質 X の局在を調べた。この実験では、タンパク質 X は、全長 (X-全長)、2つあるドメインのうち N 末端側にあるドメインのみを含む部分タンパク質 (X-N 末端)、C 末端側にあるドメインのみを含む部分タンパク質 (X-C 末端) の3種類について、それぞれ蛍光タンパク質との融合タンパク質として発現させ、細胞内の局在を観察した。結果を表1に示す。

表1 実験Iの結果

タンパク質 X の種類	X-全長	X-N 末端	X-C 末端
細胞内局在	D 領域にある 表層微小管	表層微小管	D 領域の 細胞膜直下

[実験 II]

P 細胞において、タンパク質 X とタンパク質 Y の間の距離を蛍光共鳴エネルギー移動 (fluorescence resonance energy transfer、FRET) 法により調べた。この実験では、タンパク質 X は N 末端 (X-N 末端) もしくは C 末端 (X-C 末端) を用い、タンパク質 Y は全長を用いた。その結果、D 領域における FRET 効率は、X-C 末端を用いた方が、X-N 末端を用いた場合よりも高かった。

[実験 III]

P 細胞と同じ生物種由来であるが、D 領域が形成されない細胞 (Q 細胞とする) において、タンパク質 X とタンパク質 Y の関係をさらに調べた。Q 細胞では本来タンパク質 X とタンパク質 Y は発現していない。この実験では、タンパク質 Y は通常型、恒常活性型、恒常不活性型の 3 種類をそれぞれ用いて X-C 末端と同時に Q 細胞で発現させた。X-C 末端の細胞膜直下への局在の有無を確認した結果を表 2 に示す。

表2 実験 III の結果

導入した タンパク質 Y	通常型	恒常活性型	恒常不活性型	なし
X-C 末端の 細胞膜直下の局在	あり	あり	なし	なし

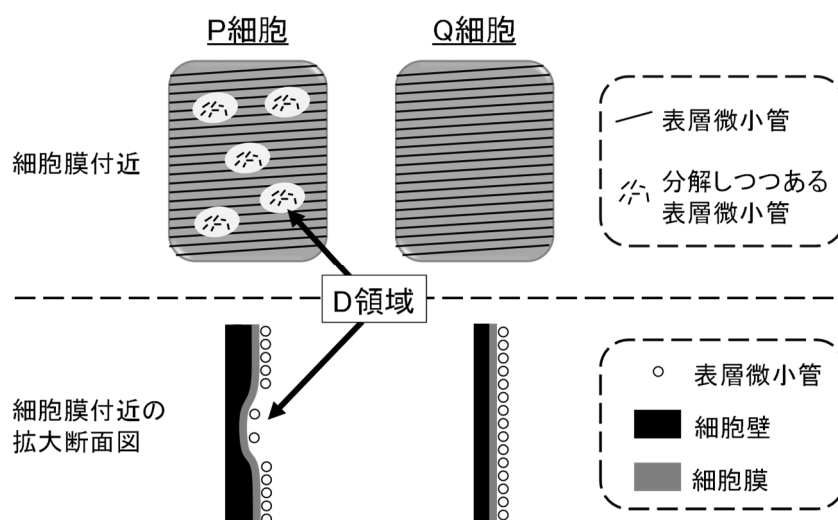


図1. P 細胞と Q 細胞の細胞膜付近の模式図。

- 問3. 実験 II の結果から示唆される、P 細胞の D 領域における X-C 末端とタンパク質 Y の関係を 1 行程度で述べよ。ただし実験 II では、P 細胞の D 領域における X-N 末端と X-C 末端の分子数は同程度であるとする。
- 問4. 実験 I~III の結果から、タンパク質 X はどのようにして D 領域の表層微小管に局在すると考えられるか。2 行程度で述べよ。
- 問5. P 細胞において、タンパク質 X は微小管分解活性を持つタンパク質 Z と相互作用し D 領域での微小管分解に関わっていると考えられる。一般に微小管分解活性をもつと考えられるタンパク質名を 1 つ挙げよ。また、タンパク質 Z が D 領域での微小管分解に関わることを示すための実験を考え、合わせて 3 行程度で説明せよ。なお、複数の実験を組み合わせて示してもよい。

[実験 IV]

D 領域の形成には、細胞膜直下におけるタンパク質 X のクラスター状の局在が必要であることがわかっている。このクラスター形成のメカニズムに迫るため、タンパク質 Y のはたらきに注目した実験を行った。Q 細胞において、X-C 末端、通常型タンパク質 Y、タンパク質 Y に対するグアニンヌクレオチド交換因子 (guanine nucleotide exchange factor、GEF) と GTPase 活性化タンパク質 (GTPase activating protein、GAP) の 4 種類を同時に発現させると、X-C 末端が細胞膜直下でクラスター状の局在を示した (図 2)。次に、通常型タンパク質 Y の代わりに恒常活性型タンパク質 Y もしくは恒常不活性型タンパク質 Y を用いて同様の実験をしたところ、細胞膜直下における X-C 末端のクラスター状の局在はいずれの場合も観察されなかった。

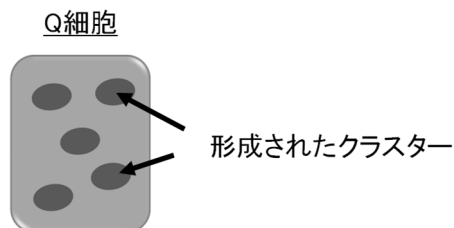


図 2. Q 細胞において形成された X-C 末端クラスターの模式図。

- 問6. 一般に、低分子量 G タンパク質 (低分子量 GTPase) は GEF と GAP によりどのように制御されているか。2 行程度で説明せよ。
- 問7. 実験 IV の結果から Q 細胞での X-C 末端のクラスター形成について示唆されることを、低分子量 G タンパク質の性質に着目して 2 行程度で述べよ。

草稿用紙

[第3問]

次の文1と文2を読み、以下の問1～8に答えよ。

<文1>

細胞はその生命活動を維持するために、特定のタイミングで特定の物質を細胞内に取り込む、あるいは排出する必要がある。細胞膜を隔てて物質を輸送するために細胞膜上に存在しているのが、(a)チャネルやトランスポーターといった膜タンパク質である。(b)トランスポーターはイオンやアミノ酸、脂質など様々な低分子を輸送基質とする。大学院生のAさんは、あるアミノ酸トランスポーターの生化学的特性を調べるために、固定化金属アフィニティークロマトグラフィー法とゲル濾過クロマトグラフィー法を用いて、そのアミノ酸トランスポーターの精製を試みた。

固定化金属アフィニティークロマトグラフィー法とはクロマトグラフィー法の一つであり、タンパク質表面のアミノ酸と金属イオンの親和性の差を利用して、タンパク質を分離精製する方法である。中でも最も広く利用されているものは、Ni-NTA（ニトリロ三酢酸）レジンを用いたNi²⁺アフィニティークロマトグラフィー法であり、この手法では、とNi²⁺イオンとの親和性の高さを利用している。Ni²⁺アフィニティークロマトグラフィー法では、(c)目的タンパク質の溶出時にイミダゾールを用いることが多い。また、(d)精製時に低pHのバッファーを用いることは原則として好ましくないといった注意点がある。

一方、ゲル濾過クロマトグラフィー法は、固定化金属アフィニティークロマトグラフィー法と同様にクロマトグラフィー法の一つであるが、タンパク質の分子量や形状の違いによってタンパク質を分離精製するという点に違いがある。ゲル濾過クロマトグラフィー法では、(e)分子量の大きなタンパク質ほど早く溶出され、小さなタンパク質ほど遅く溶出されるという特徴がある。

問1. 下線部 (a) について。以下の (イ) ～ (オ) に示すチャネルとトランスポーターに関する説明のうち、正しいものをすべて選べ。

- (イ) トランスポーターは常に ATP の加水分解エネルギーを利用して基質を輸送する。
- (ウ) チャネルの基質輸送速度は一般的に、トランスポーターよりも速い。
- (エ) トランスポーターは一般的に、チャネルよりも熱的安定性が高い。
- (オ) トランスポーターは単量体で、チャネルは多量体で機能する。

問2. 下線部 (b) について。神経細胞に発現しているトランスポーターとして、1 分子の ATP を分解して 3 個の Na^+ を細胞内から細胞外に、2 個の K^+ を細胞外から細胞内に輸送する Na^+/K^+ -ATPase と呼ばれるタンパク質が存在する。これについて、以下の小問 (1) ~ (4) に答えよ。ただし、温度 $T=298\text{ K}$ 、気体定数 $R=8.31\text{ J/mol}\cdot\text{K}$ 、ファラデー定数 $F=96,500\text{ J/V}\cdot\text{mol}$ 、細胞の膜電位は -70.0 mV 、細胞外 Na^+ 濃度 $[\text{Na}^+]_{\text{out}} = 150\text{ mM}$ 、細胞内 Na^+ 濃度 $[\text{Na}^+]_{\text{in}} = 10.0\text{ mM}$ 、細胞外 K^+ 濃度 $[\text{K}^+]_{\text{out}} = 5.00\text{ mM}$ 、細胞内 K^+ 濃度 $[\text{K}^+]_{\text{in}} = 100\text{ mM}$ とする (図 1)。なお、M は mol/L を意味する。また、 $\log_e 2 = 0.693$ 、 $\log_e 3 = 1.10$ 、 $\log_e 5 = 1.61$ とする。

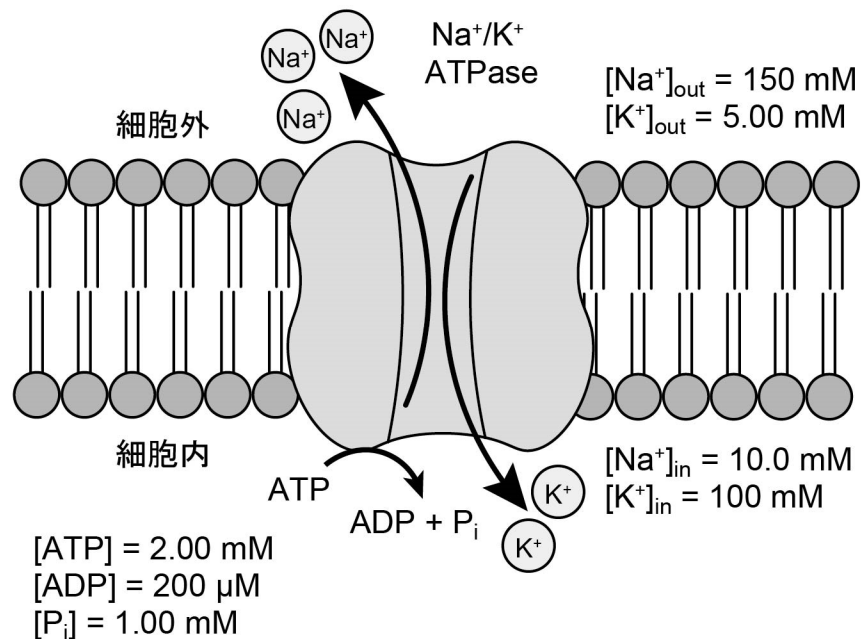


図 1. Na^+/K^+ -ATPase による ATP 依存性 Na^+ 、 K^+ 輸送。

- (1) 電荷 Z を持つイオンを濃度 c_1 の部位から c_2 の部位に輸送する際の (ギブス) 自由エネルギー変化 ΔG は、温度 T 、気体定数 R 、濃度 c_1 、濃度 c_2 、電荷 Z 、ファラデー定数 F 、電位差 $\Delta\psi$ を用いて $\Delta G = RT \cdot \log_e (c_2/c_1) + ZF\Delta\psi$ と表せる。このとき、 Na^+ が細胞外に流出する際の (ギブス) 自由エネルギー変化 ΔG_{Na} は何 kJ/mol となるか。有効数字 3 桁で解答し、計算過程が分かるように記すこと。
- (2) K^+ が細胞内に流入する際の (ギブス) 自由エネルギー変化 ΔG_{K} は何 kJ/mol となるか。有効数字 3 桁で解答し、計算過程が分かるように記すこと。
- (3) ATP の加水分解に伴う (ギブス) 自由エネルギー変化 ΔG_{ATP} は何 kJ/mol となるか。有効数字 3 桁で解答し、計算過程が分かるように記すこと。ただし、ATP の加水分解による生化学的標準状態での自

由エネルギー変化は $\Delta G^{\circ} = -30.5 \text{ kJ/mol}$ とし、ATP、ADP、 P_i の濃度はそれぞれ 2.00 mM、200 μM 、1.00 mM とする。

- (4) (3) の条件において、 Na^+/K^+ -ATPase が 1 mol の ATP を加水分解し、 Na^+ と K^+ を輸送する際の (ギブス) 自由エネルギー変化は何 kJ となるか。有効数字 3 桁で解答し、計算過程が分かるように記すこと。

問3. に当てはまる最も適切なアミノ酸の名称を日本語もしくは英語で記せ。

問4. 下線部 (c) について。なぜイミダゾールを添加することで目的タンパク質の溶出が可能なのかを 2~3 行程度で説明せよ。ただし、イミダゾールの構造式は図 2 に示すとおりである。

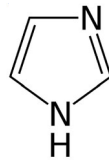


図 2. イミダゾールの構造式。

問5. 下線部 (d) について。 Ni^{2+} アフィニティークロマトグラフィー法によるタンパク質精製実験では、目的タンパク質の結合やそれに続くレジンの洗浄の際に、原則として低 pH のバッファーを使用してはならない。その理由として、低 pH による目的タンパク質の変性の回避がある。それ以外の理由を 3 行程度で説明せよ。

問6. 下線部 (e) について。なぜゲル濾過クロマトグラフィー法では分子量の大きなタンパク質ほど早く溶出され、小さなタンパク質ほど遅く溶出されるのか、その理由を 3 行程度で説明せよ。

<文 2>

大学院生の A さんが精製したアミノ酸トランスポーターは、ロイシンを輸送することが知られていた。しかし、A さんはこのアミノ酸トランスポーターがロイシン以外のアミノ酸も輸送するのではないかと考え、放射性同位元素で標識されたアミノ酸と^(f)リポソームを利用した以下の実験 I を行った。

[実験 I]

精製したアミノ酸トランスポータータンパク質をリポソームに埋め込み、その後、リポソームの外液に 1 mM の基質候補アミノ酸と放射性同位元素 ^3H で標識した 0.08 mM の ^3H -ロイシンを添加することで、アミノ酸の取り込み反応を開始させた。反応開始から 2 分後に反応溶液を膜フィルター上に移し、逆側からバキュームで吸引することによりリポソームを膜フィルターに吸着させた。さらに冷やしたバッファーで膜フィルターを 2 回洗浄し、最後に膜フィルターに残存する放射活性を測定した。なお、M は mol/L を意味する。

問7. 下線部 (f) について。リポソームとはどのようなものか、1 行程度で説明せよ。

問8. 実験 I から、A さんは図 3 に示す結果を得た。この結果から、実験に用いたアミノ酸トランスポーターはどのアミノ酸とよく結合していることが分かるか。また、それらのアミノ酸はどのような特徴を有していると言えるか。理由と合わせて 3 行程度で説明せよ。

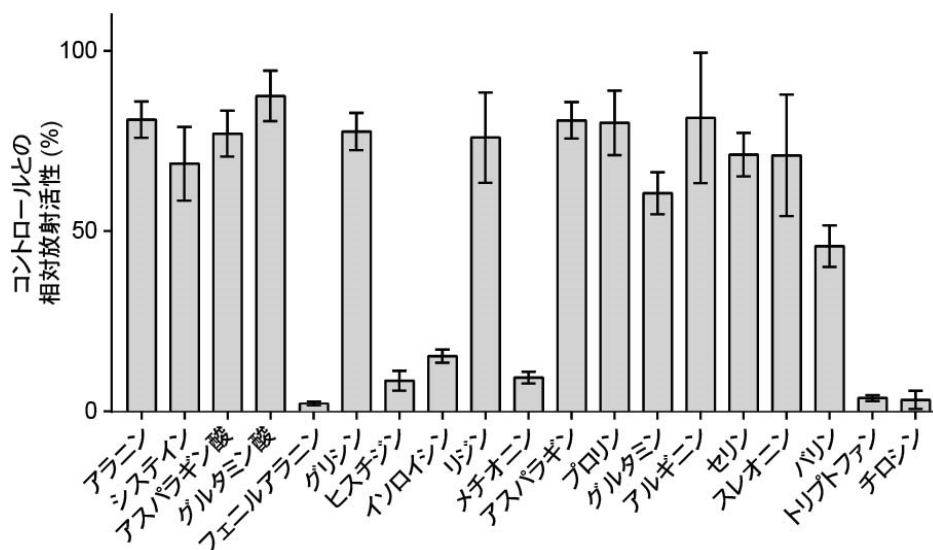


図 3. リポソームと精製タンパク質を用いたアミノ酸取り込みアッセイの結果。添加した基質候補のアミノ酸を下に表示している。コントロールは反応溶液中に ^3H -ロイシンのみを添加したものであり、エラーバーは平均値±標準偏差を表している。Yan *et al.*, *Nature*, 2019 より改変。

[第4問]

次の文1と文2を読み、以下の問1～6に答えよ。

<文1>

1つの生物種の集団間でみられる形質の違いは、世代ごとの対立遺伝子頻度の変化が蓄積することで生じてきた。(a)対立遺伝子頻度の変化はさまざまな要因によって起きる。このうち、無作為抽出の効果によって生じる確率的な遺伝子頻度の変動のことを と呼ぶ。集団の個体数が一時的に大きく減少すると遺伝的多様性が著しく低下することがあり、この効果を と呼ぶ。個体数が減少した集団では近親交配が進むため、一般に個体の適応度が低下する。このような近親交配に伴う適応度の低下を と呼ぶ。 は一般に、 の有害突然変異の効果が表出することで起こることが多い。

集団における対立遺伝子頻度の変化について考える。対立遺伝子 A 、 a の頻度をそれぞれ p 、 q とする。遺伝子型 AA 、 Aa 、 aa の間で適応度に差がないとき、個体数が有限の集団では対立遺伝子 A はいずれ固定もしくは消失するが、(b)このうち固定する確率は p で与えられることが知られている。

問1. 文1の ～ に適切な用語を入れよ。 には顕性（優性）または潜性（劣性）のいずれかが入る。

問2. 下線部 (a) について。 以外の要因を1つ挙げよ。 で挙げた用語以外を答えること。

(次のページに続く)

問3. 下線部 (b) について。以下の小問 (1) ~ (4) に答えよ。

- (1) 下線部 (b) の知見に基づいて、ある時点で生まれた中立な突然変異は個体数が多い集団と少ない集団のどちらでより固定しやすいか。以下の (ア) ~ (ウ) から1つ選べ。

- (ア) 個体数が多い集団で固定しやすい
(イ) 個体数が少ない集団で固定しやすい
(ウ) 固定確率は集団の個体数に依存しない

- (2) 個体数 N からなる2倍体集団を考える。1倍体ゲノムあたり、世代あたり μ 箇所の突然変異が生じるとする。この集団における中立な突然変異の置換速度を計算せよ。計算過程も示すこと。ただし、同じ箇所に複数の突然変異は生じないものとする。

- (3) 頻度 p の対立遺伝子 A が固定する際に、固定に至るまでの平均期待世代数は

$$-4N \left(\frac{1-p}{p} \right) \ln(1-p) \quad \dots\dots\dots \text{(式1)}$$

で与えられる。また、消失する際には、消失に至るまでの平均期待世代数は

$$-4N \left(\frac{p}{1-p} \right) \ln(p) \quad \dots\dots\dots \text{(式2)}$$

で与えられる。これらを踏まえ、頻度 p の対立遺伝子 A が、対立遺伝子 a とともに集団中に固定もせず消失もせず存続する平均期待世代数 T を計算せよ。計算過程も示すこと。

- (4) (3) の結果を踏まえ、 T がもっとも長くなる初期頻度 p を求めよ。計算過程も示すこと。

(次のページに続く)

<文2>

1つの生物種の集団はいくつもの分集団からなることが多い。分集団ごとに遺伝子頻度が増加することで生じる遺伝的分化の過程について考える。個体数の等しい2つの分集団1、2を仮定し、対立遺伝子 B 、 b の分集団1での頻度をそれぞれ s_1 、 t_1 、分集団2での頻度をそれぞれ s_2 、 t_2 とする。遺伝子型 BB 、 Bb 、 bb の間で適応度に差はないものとする。

分集団1、2を合わせた集団全体でのホモ接合体頻度と、分集団ごとのホモ接合体頻度とを比較することを考える。各分集団の個体数は十分大きく、分集団内ではランダム交配が仮定できる時、2つの分集団の遺伝子型 BB の頻度の平均 R_s は オ となる。一方、集団全体での対立遺伝子 B の頻度は カ となることから、集団全体での遺伝子型 BB の期待頻度 R_T は キ となる。

⑥ R_s と R_T との差 $R_s - R_T$ は、 s_1 と s_2 の分散 σ^2 と等しくなる。分散は常に非負の値をとることを踏まえると、各分集団のホモ接合体 BB の頻度の平均値は、集団全体のホモ接合体 BB の期待頻度よりも低くなることはない。2つの分集団間の遺伝的分化の指標として以下の固定指数 F_{ST} について考える。

$$F_{ST} = \frac{\sigma^2}{st} \quad \dots\dots\dots \text{(式3)}$$

ただし、 s 、 t はそれぞれ集団全体での対立遺伝子 B 、 b の頻度とする。 F_{ST} は0から1の値をとる統計量であり、分集団間の遺伝的分化が大きいと ク に、小さいと ケ に近づく。

問4. 文2の オ ~ キ に適切な数式、 ク と ケ に0もしくは1を入れよ。

問5. 下線部(c)を示せ。ただし、 x_1, x_2, \dots, x_n の分散は、

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad \dots\dots\dots \text{(式4)}$$

で与えられる (\bar{x} は x_1, x_2, \dots, x_n の平均値とする)。

問6. 固定指数 F_{ST} について。ヒトのゲノムワイドな多型データに基づいて、多数の分集団間の F_{ST} が計算されてきた。一般に、分集団間の陸地上での地理的距離と F_{ST} との間にはどのような傾向がみられると考えられるか。理由とともに3行程度で説明せよ。

草稿用紙

[第5問]

【小問1】（生物化学分野）

細胞内カルシウムイオンはセカンドメッセンジャーとして多くの機能を持つ。細胞内カルシウムイオン濃度 ($[Ca^{2+}]_i$) の変化を明らかにすることは細胞機能を理解するうえで非常に重要であり、多くの場合、光を用いた計測が用いられる。 $[Ca^{2+}]_i$ とその計測法について、以下の (1) ~ (3) に答えよ。

- (1) 生理的な条件で、細胞が細胞外のシグナル分子を受容してから $[Ca^{2+}]_i$ が上昇するまでの分子機序について、三量体 G タンパク質を介するものと介さないものを、それぞれ1つずつ例を挙げて、それぞれ2行程度で説明せよ。
- (2) $[Ca^{2+}]_i$ の計測法として、Fura-2 などの低分子化合物と G-CaMP などのタンパク質を用いた蛍光イメージングが挙げられる。これらの分子を使用すると、なぜ $[Ca^{2+}]_i$ 変化を検出できるのか、どちらかの種類の分子を例にとり、その原理を4行程度で説明せよ。
- (3) $[Ca^{2+}]_i$ を光軸方向に高い解像度で計測する蛍光イメージング法として、共焦点レーザー走査型顕微鏡と2光子励起顕微鏡が挙げられる。いずれかの顕微鏡の原理を4行程度で説明せよ。説明に図を用いても構わないが、行数にはカウントしない。

【小問 2】（生物化学分野）

遺伝子工学および発生工学について、以下の（1）～（3）に答えよ。

- (1) 遺伝子工学に用いられる大腸菌は、導入するプラスミドの安定性の維持や遺伝子操作の効率化の目的で、いくつかの工夫がなされている。例えば、相同組換えに関与する遺伝子である *recA*、DNA エンドヌクレアーゼをコードする *endA*、 β -ガラクトシダーゼをコードする *lacZ* の各遺伝子に変異が導入された変異株がよく用いられる。これら 3 つの遺伝子への変異の導入がどのような遺伝子工学上の利点をもたらすか、それぞれ 2 行程度で説明せよ。
- (2) プラスミド上にクローニングした遺伝子に突然変異を導入したい。PCR（polymerase chain reaction）法を用いて変異を導入する際には、遺伝子の特定の位置に塩基置換を導入する方法や、遺伝子の不特定の位置に塩基置換をランダムに導入する方法がある。これらの方法では、どのように DNA 伸長反応を行うか、それぞれ 3 行程度で説明せよ。
- (3) CRISPR/Cas9 システムを用いたノックアウトマウスの作製の際には、標的遺伝子以外のゲノム領域に変異が導入されることがあり、それらはオフターゲット変異と呼ばれる。オフターゲット変異による表現型を、標的遺伝子の変異による表現型と混同してしまうことを防ぐための有効な方法を 2 つ挙げ、それぞれ 2 行程度で説明せよ。

【小問 3】（生物情報科学分野）

数理モデルを用いた実験データの解析について、以下の (1) ~ (3) に答えよ。

- (1) ある受容体 R はリガンド L と結合して活性化受容体 P となる。受容体 R の濃度 ($[R]$) と活性化受容体 P の濃度 ($[P]$) の時間変化が、以下の微分方程式で記述できるとする。ただし、受容体 R と活性化受容体 P の濃度は、細胞膜上の単位面積当たりの量を表す。

$$\frac{d[R]}{dt} = -k[L][R]$$
$$\frac{d[P]}{dt} = k[L][R] - \frac{1}{\tau}[P]$$

ここで、 k や τ はパラメータである。また、リガンド L の濃度 ($[L]$) は一定とする。この微分方程式において、 $-\frac{1}{\tau}[P]$ の項は何を意味していると考えられるか。活性化受容体 P の生化学的な性質と τ の関係について考察しつつ、3行程度で説明せよ。

- (2) (1) について、受容体 R を発現する培養細胞にリガンド L を添加し、受容体 R と活性化受容体 P の濃度の時系列データを取得した。この実験結果を再現できる微分方程式モデルのパラメータの値を得る方法について、以下の用語をすべて使って 3 行程度で説明せよ。それぞれの用語には下線を引くこと。

コスト関数、初期値、最適化、微分方程式ソルバ、2乗和

- (3) 実験データに対して数理モデルが過剰に適合して、汎化能力が失われることがある。それを防ぐために用いられる手法を2つ挙げ、それぞれ2行程度で説明せよ。

【小問 4】（動物学分野）

次の文を読み、以下の (1) ~ (4) に答えよ。

多くの哺乳類は、環境温度に関わらず体温をほぼ一定に保つ仕組みを持ち、温度が異なる様々な環境へ生息域を拡大してきた。体温調節中枢は視床下部の に存在し、末梢からの温度情報に応じて熱産生や熱放散の指示を出す。温度感受性 ファミリーは、6 回膜貫通型タンパク質で、種類ごとに異なる温度に反応して活性化することで末梢組織における環境温度の感知に関わる。活性化した は を細胞内に流入させることで神経細胞を脱分極させ、続いて が活性化して活動電位を生じることで、その信号は中枢神経系に送られる。高温に応答する一部の神経細胞は中枢に信号を送るだけでなく (a) 血管拡張物質 を分泌して血流を介した熱の放散を促進する。

- (1) 文中の空欄 ~ に入る最も適切な語を、語群から選んで答えよ。同じカタカナの空欄には同じ語が入る。

【語群】 視交叉上核、乳頭体、視索前野、室傍核、Piezo チャンネル、TRP チャンネル、チャンネルロドプシン、グルタミン酸受容体、 K^+ イオン、 Cl^- イオン、陽イオン、陰イオン、電位依存性 Na^+ チャンネル、電位依存性 K^+ チャンネル、 Na^+-K^+ ポンプ、 Na^+-Ca^{2+} 交換輸送体

- (2) 下線部 (a) について。血管作動性物質として拡張作用・収縮作用をもつ内因性の生理活性物質の名称をそれぞれ 1 つずつ挙げよ。
- (3) 哺乳類における主要な熱産生経路として、定常的な代謝、ふるえ熱産生（骨格筋の規則的な収縮）のほかに、非ふるえ熱産生がある。非ふるえ熱産生を担う主要な組織名とその熱産生メカニズムについて、合わせて 3 行程度で説明せよ。
- (4) 水の高い熱伝導性のため、一般に水棲動物が体温を高く保つことは困難であるが、一部の魚類は常時遊泳することで筋肉を比較的高い温度に維持する。こうした魚類には筋肉に向かう動脈とエラに向かう静脈が近接して反対方向に流れる対向流系の構造が見られる。このような構造の体温調節における役割を 3 行程度で説明せよ。また、対向流系は体温維持以外の目的にも利用される例がある。そのような例を 1 つ取り上げ、組織名とどのような目的に利用されているかを 1 行程度で述べよ。

【小問 5】（動物学分野）

次の文を読み、以下の (1) ～ (4) に答えよ。

動物の個体発生は単一の受精卵から始まり、成体を構成する多様な細胞へと段階的に分化が進む。例えばマウスの受精卵が一定回数の卵割により細胞数を増やすと、 と呼ばれる一層の細胞シートの中に、内部細胞塊を形成した胚盤胞という構造ができる。^(a)さらに発生が進むと、内部細胞塊は、全ての体細胞へと分化できるエピブラストに分化し、 は などへと分化する。個体発生においては不可逆的に進む細胞分化を実験的な操作により人工的に逆転させ、最終分化した体細胞が、受精卵や内部細胞塊、エピブラストのような未分化な細胞に戻る現象のことを と呼ぶ。例えば、成体マウス線維芽細胞に由来するクローン個体を作製するには、 した別個体の未受精卵に線維芽細胞に由来する を注入し、電気刺激を行うことでクローン胚を樹立し、代理母の子宮中で発生させる。

- (1) 文中の空欄 ～ に入る適切な語をそれぞれ記せ。同じカタカナの空欄には同じ語が入る。
- (2) 下線部 (a) について。ヒトとマウスの胚性幹細胞 (ES 細胞) が、内部細胞塊とエピブラストのいずれに相当するかを、それぞれ答えよ。
- (3) マウスにおける内部細胞塊とエピブラストとで、細胞の分化能の違いを示すことができる実験を考え、期待される実験結果と合わせて 5 行程度で説明せよ。
- (4) このようなマウス初期胚の発生プロセスを踏まえ、目的遺伝子を破壊した ES 細胞株を用いて、特定の遺伝子が完全に破壊されたノックアウトマウス個体を作製する方法を 5 行程度で答えよ。なお、ES 細胞における遺伝子破壊の操作については説明しなくて良い。

【小問 6】（動物学分野）

動物の性決定について、以下の (1) ~ (3) に答えよ。

- (1) 昆虫類には雌雄の性がモザイク状に一個体中に混在する「ジナンドロモルフ」(gynandromorph) という現象が知られる。しかしジナンドロモルフは哺乳類では報告例がない。両者の間で性決定や性分化の仕組みにどのような違いがあることでこのような違いが生じるのか、4 行程度で記せ。
- (2) ヒトなどでは性は遺伝的、すなわち性染色体によって決定される。その一方、動物の中には、環境条件により性が決定される例も知られる。環境による性決定にはどのような様式があるか、そのような例が知られる動物分類群を 1 つ挙げて、引き金となる環境条件について、合わせて 2 行程度で説明せよ。
- (3) 季節多型を示すアブラムシは XX/XO 型の性染色体による性決定様式を持つが、春から秋の期間には XX のメスのみが胎生単為生殖によって増殖する。秋になると、低温短日条件に応答して XX のメスが胎生単為生殖により XO のオスを産生する。この際には、卵形成時に X 染色体を一本放出することで XO となる。出現した雌雄の個体は有性生殖を行い、越冬卵を産む。春になり越冬卵から孵化個体が出現するが、これら越冬卵からの孵化個体は全てメス個体となることが知られる。

(3-1) 一般的に、 XO のオスが精子形成をし、その精子が卵と受精した場合、オスの個体も出現することが期待される。その理由について、減数分裂の際の X 染色体の分配に着目して、2 行程度で記せ。

(3-2) アブラムシでは、精子形成から受精にかけてどのような仕組みによって、越冬卵はメスのみとなると考えられるか。3 行程度で説明せよ。

【小問 7】（植物学分野）

次の文を読み、以下の (1) ~ (4) に答えよ。

植物の体細胞分裂を理解することは植物の発生を理解するうえでも重要である。植物細胞には細胞壁が存在し、(a)細胞分裂の進行は動物細胞と大きく異なる。また細胞の組織内での位置に応じて、(b)秩序立った発生のための細胞分裂が進行する。

細胞分裂を解析するために、シロイヌナズナ培養細胞の細胞分裂を阻害する化合物をリン酸化酵素阻害剤のライブラリーから探索し、阻害剤 X を得た。阻害剤 X をシロイヌナズナの培養細胞および初期胚に与えると、両者において核を 2 つもつ異常な細胞が生じた。阻害剤の作用機序を調べるため、培養細胞を用いたリン酸化プロテオーム解析を行ったところ、(c)あるモータータンパク質の特定のアミノ酸におけるリン酸化レベルが低下していることが分かった。シロイヌナズナのゲノムにはこのモータータンパク質をコードする遺伝子が 2 コピーあり、両方とも破壊すると核を 2 つもつ異常な細胞が生じた。

- (1) 下線部 (a) について。以下の用語を全て使って、動物細胞との違いにふれながら、被子植物の体細胞分裂の進行を 3 行程度で説明せよ。それぞれの用語には下線を引くこと。

G2 期、分裂準備帯（前期前微小管束／preprophase band）、中心体、紡錘体、隔膜形成体（phragmoplast）、細胞板

- (2) 下線部 (b) について。シロイヌナズナのシュート頂分裂組織における細胞分裂の特徴について、3 行程度で述べよ。
- (3) 下線部 (c) について。阻害剤 X の添加により、なぜ核を 2 つもつ異常な細胞が生じたと考えられるか。阻害剤 X の作用機序について、モータータンパク質と細胞骨格の種類にふれながら、4 行程度で述べよ。
- (4) (3) で述べた作用機序が正しいか調べるための実験を考え、5 行程度で述べよ。

【小問 8】(植物学分野)

次の文を読み、以下の (1) ~ (4) に答えよ。

頂芽優勢はシステミックな形態形成の制御系として、古くから興味をもたれ、解析されてきた。1930年代に明らかになったのは、植物ホルモンの が頂芽から根に向けて輸送されており、それが流路にある下位の腋芽^{えきが}の休眠を維持させ、発達を抑えているというものである。さらに腋芽に局所的に別の植物ホルモン を投与すると、頂芽の存在下でも休眠が解除されることから、「 が頂芽から根に向けて輸送されている間は、その流路の腋芽では が合成されないため腋芽が発達できない」とする (a)古典的制御モデルが、長らく多くの教科書で解説されてきた。しかし近年、シロイヌナズナにおいて や とは (b)別の植物ホルモンによる制御系の変異体が頂芽優勢の異常を示すことが見出され、制御モデルは刷新された。

さらに最近、頂芽を除去したときに下位にある腋芽の休眠が解除されるしくみとして、腋芽での植物ホルモン量が増加する前に、(c)別の低分子化合物の流れの変化があると知られるようになっている。

- (1) 文中の空欄 と に入る植物ホルモンの名前をそれぞれ記せ。同じカタカナの空欄には同じ語が入る。
- (2) 下線部 (b) について。植物ホルモン名を記しつつ、どのようなシステミック制御系となっているか、3行程度で述べよ。
- (3) 下線部 (c) について。低分子化合物の名称を記しつつ、どのようなシステミック制御系となっているか、3行程度で述べよ。
- (4) 上記のように、腋芽に局所的に を投与すると、頂芽の存在下でも頂芽優勢が解除される。しかしごく最近、頂芽を切除した結果として、腋芽の部位への の供給が止まるよりも先に、腋芽部位での の合成が始まることが判明した。また の合成のタイミングは下線部 (c) の低分子化合物の供給増加と相関していることが見出されている。このことから、下線部 (a) の古典的制御モデルは修正が提案されている。どのような修正と考えられるか、5行程度で述べよ。

【小問 9】（植物学分野）

草本植物の一部の種でみられる C₄ 光合成について、以下の (1) ~ (4) に答えよ。

- (1) C₄ 光合成では、葉肉細胞で C₃ 光合成と異なる生合成反応により無機炭素が固定される。この反応について、基質となる物質とこの反応ではたらく酵素、C₄ 光合成の名前のもとになった生成物のそれぞれの名前を挙げて 3 行程度で説明せよ。
- (2) 大気条件として、O₂ 濃度は一定のまま CO₂ 濃度を変えて測定した光合成の最大量子収率（弱光条件で 1 mol の光量子あたりに固定される CO₂ 分子のモル数）を C₄ 光合成と C₃ 光合成とで比較すると、ある CO₂ 濃度以下では C₃ 光合成より C₄ 光合成のほうが高くなる。この理由を 2 つの観点から、あわせて 2 行程度で述べよ。
- (3) 生理的な範囲内で温度を変えて測定した光合成の最大量子収率を、C₄ 光合成と C₃ 光合成とで比較すると、ある温度以上では C₃ 光合成より C₄ 光合成のほうが高くなる。この理由を、水への溶解度の温度依存性が気体の種類によって異なることや、酵素の温度依存性が基質の種類によって異なることを考慮して、6 行程度で述べよ。
- (4) C₄ 光合成を行う草本植物の多くは草原のような強い光を受ける環境に分布し、林床のような暗い環境にはほとんど分布していない。C₃ 光合成に比べて C₄ 光合成が弱光環境で不利な理由を 5 行程度で述べよ。

【小問 10】（人類学分野）

現代人（ホモ・サピエンス）の二足歩行は、チンパンジーの二足歩行と比較して、移動仕事率（cost of transport）が小さい、すなわち移動のエネルギー効率が低いことが示されている。以下の（1）～（3）に答えよ。

- （1） 移動仕事率とは何か。2行程度で説明せよ。
- （2） どのような要因で現代人のほうがチンパンジーよりも二足歩行のエネルギー効率が低いのか。5行程度で説明せよ。
- （3） 現代人の二足歩行のエネルギー効率が、チンパンジーの四足歩行（ナックル歩行）よりも高いことをもって、移動のエネルギー効率に選択圧が作用して、初期人類において直立二足歩行が進化したと考える仮説がある。この仮説について3行程度で批判的に論ぜよ。

【小問 11】（人類学分野）

ヒトの生活史には近縁の類人猿と異なる特徴がある。狩猟採集民と野生チンパンジーの生活史変数の比較を表 1 に示す。これらの数値を使って、以下の (1) ~ (4) に答えよ。なお、狩猟採集民の値は、これらの狩猟採集民がほぼ完全に野生動植物に依存していた時代に収集されたデータに基づく。

表 1 ヒトとチンパンジーの生活史変数

	狩猟採集民	野生チンパンジー
出生から 15 歳までの生存確率	0.60	0.35
第 1 子出生時の母親平均年齢	19.7 年	14.3 年
末子出生時の母親平均年齢	39.0 年	27.7 年
15 歳に達した個体の平均死亡年齢	54.1 年	29.7 年
平均出産間隔	41.3 月	66.7 月
5 歳時の平均体重	15.7 kg	10 kg
10 歳時の平均体重	24.9 kg	22.5 kg

複数集団の平均値 (Kaplan *et al.*, 2000. *Evolutionary Anthropology* より改変)

- (1) ヒトとチンパンジーの間に見られる寿命と性成熟の違いについて表 1 から読み取れることを、合わせて 2 行程度で説明せよ。
- (2) 「おばあちゃん仮説」(grandmother hypothesis) とは何か。表 1 の数値を使って 3 行程度で説明せよ。
- (3) 狩猟採集民の新生児の体重は約 3 kg、野生チンパンジーでは約 2 kg である。これらと表 1 の数値を使って、ヒトとチンパンジーの間に見られる 10 歳までの成長パターンの違いを 3 行程度で説明せよ。
- (4) 以上の観察から、ヒトはチンパンジーと比べて長い子ども期をもつと考えられる。狩猟採集民の子どもが 15 歳までに消費するエネルギーは、生涯消費エネルギー量の 25%を超えるが、狩猟採集などにより 15 歳までに自ら獲得するエネルギーは、生涯獲得エネルギー量の 5%以下である。このことから示唆されるヒトに特徴的な生活史について、2 行程度で説明せよ。

【小問 12】（人類学分野）

更新世に旧人から現生人類への遺伝子移入が起きたため、ヒトゲノム中には、旧人の系統で生じた派生型対立遺伝子（旧人由来変異）が観察される。旧人からの遺伝子移入に関する、以下の（1）～（5）に答えよ。

- （1） アフリカ人集団とヨーロッパ人集団を比べると、ネアンデルタール人由来変異が多く観察されるのはどちらの集団か答えよ。
- （2） ヨーロッパ人集団とアジア人集団を比べると、デニソワ人由来変異が多く観察されるのはどちらの集団か答えよ。
- （3） ヒトゲノム中で近傍に位置する旧人由来変異どうしは、連鎖不平衡の関係にある場合が多い。その理由を 5 行程度で説明せよ。
- （4） ヒトゲノム中の機能的領域と非機能的領域を比較すると、ネアンデルタール人由来変異の密度が低いのはどちらの領域か、その理由も含め 5 行程度で説明せよ。
- （5） 現代人の Y 染色体には旧人由来変異は見つかっていない。その理由は明らかではないが、観察されない理由を自身で 2 つ考え、それぞれ 2 行程度で答えよ。

【小問 13】（進化・自然誌学分野）

島の生物に関する以下の（1）～（3）に答えよ。

- （1）大陸島と海洋島の生物相の違いを、それぞれの地史を踏まえて 5 行程度で説明せよ。
- （2）海洋島に見られる固有種の多さに影響する島の特性を 3 つあげよ。
- （3）ある海洋島に固有の生物種 A と、種 A に近縁でこの海洋島には分布しない種 B～E について、DNA の塩基配列を用いて系統解析を行った。その後、枝の長さを適切に補正して枝の長さが時間に比例する図 1 の系統樹を得た。この系統樹を用いて、分岐 X の年代を推定したい。このとき、種 A と種 B が分岐した年代（分岐 Y の年代）にこの海洋島の成立年代を当てはめて年代を較正（キャリブレーション）すると、分岐 X の年代を過大推定してしまう場合と、過小推定してしまう場合がある。それらはどのような場合か。過大推定する場合と過小推定する場合のそれぞれについて、3 行程度で説明せよ。

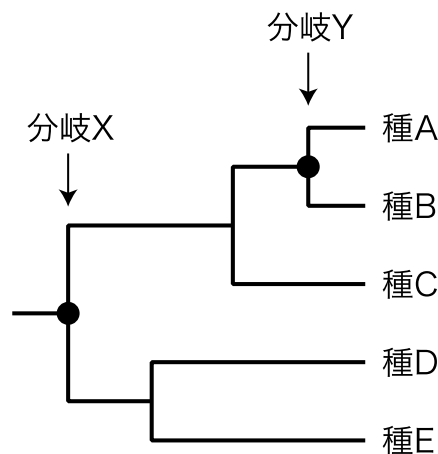


図 1. 種 A～E の系統樹